

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ  
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**ВДОВИЧЕНКО Антон Валерійович**

**УДК 621.317.38**

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ  
АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПРИ МАЛОМУ СПІВВІДНОШЕННІ АКТИВНОЇ  
ТА ПОВНОЇ ПОТУЖНОСТІ**

05.01.02 – Стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Київ – 2019**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації експериментальних досліджень Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

- Науковий керівник** доктор технічних наук, професор,  
**ТУЗ Юліан Михайлович**,  
зав. кафедрою автоматизації експериментальних досліджень, лауреат державної премії України в галузі науки та техніки.
- Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник,  
**ТЕСИК Юрій Федорович**,  
відділ електричних і магнітних вимірювань № 5 Інститут електродинаміки Національної академії наук України, провідний науковий співробітник, лауреат державної премії України в галузі науки та техніки;
- кандидат технічних наук,  
**ШЕВКУН Сергій Миколайович**,  
науково-дослідний відділ державних еталонів електромагнітних величин, часу і частоти (відділ № 11), державне підприємство "Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів"  
(ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»), начальник.

Захист відбудеться «27» серпня 2019 року о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.20 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 115, корп. 22, ауд. 316.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І.Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «        » червня 2019 року.

**Вчений секретар**  
**спеціалізованої вченої ради**  
**канд. техн. наук, доцент**

**А.І. Замулко**

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Мінімізація втрат енергії при перетворенні та комутації потоків електричної енергії в процесі розвитку силової електроніки призвела до розширення номенклатури пристроїв - промислових інверторів для джерел сонячної, вітрової, термальної та інших енергій, перетворювачів, що поліпшують якість напруги живлючої мережі, мініатюрних побутових блоків живлення та ін. Відбулося зменшення маси та габаритів перетворювачів електроенергії, тобто збільшення їх питомої потужності, в першу чергу шляхом підвищення частоти проміжного перетворення електроенергії. Розвитку сприяли поява нових рішень в побудові перетворювачів електроенергії та зміна елементної бази напівпровідникових елементів. Подальша мінімізація втрат, що викликана питанням економії електроенергії та постійним збільшенням споживачів електроенергії, висуває до перетворювачів електроживлення жорсткі вимоги по визначенню та підвищенню коефіцієнта корисної дії (ККД), що неможливо без проведення точних вимірювань втрат (активної потужності).

Основні втрати, що знижують ККД в перетворювачах, змістилися в бік високочастотних втрат в реактивних елементах (дроселі, трансформатори, конденсатори), які є необхідною складовою будь-якого перетворювача енергії. Вимірювання втрат перетворювачів електроенергії та їх реактивних елементів відбувається під дією таких факторів, як широкий діапазон частот, наявність великої кількості гармонійних складових та можливий малий коефіцієнт потужності, тобто мале співвідношення активної та повної потужності. Вирішення завдання вимірювання втрат дозволяє правильно вибрати конструкцію реактивних елементів та оптимізувати їх режим роботи. Одержані результати також можуть знайти застосування при оцінці ефективності систем силової електроніки, наприклад, при вимірюванні енергії, що передається в системах бездротової передачі електроенергії.

При вимірюваннях активної потужності в широкому діапазоні частот присутні похибки від фазових зсувів в каналах перетворення струму та напруги та похибки від власного споживання вхідних ланок, які, крім сильного спотворення результатів вимірювання, призводять до того, що паспортна точність забезпечується тільки при певному співвідношенні номінальних меж струмів та напруг. Актуальність дисертаційної роботи полягає в дослідженні та створенні нових методів вимірювання активної потужності при малому співвідношенні активної та повної потужностей в широкому діапазоні частот та створенні таких структурних рішень, які дозволять мінімізувати похибки від власного споживання та впливу фазових зсувів каналів вимірювання потужності.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота пов'язана з дослідженням методів та засобів підвищення точності вимірювання активної потужності в широкому діапазоні частот. В основу роботи було покладено завдання, що виконувалось кафедрою автоматизації експериментальних досліджень КПІ ім. Ігоря Сікорського, за темою «Підготовка до розробки ватметра для вимірювання потужності витрат в індуктивних елементах при несинусоїдальному струмі. Розробка методів мінімізації похибок від власного споживання в послідовно-паралельних колах ватметра.» (№ держ. реєстрації 0112U005384). Під час роботи над дисертацією здобувачем була отримана стипендія

німецької служби академічних обмінів DAAD для проведення практики в лабораторії Силової електроніки та Автоматичного контролю вищої школи (університет прикладної науки) міста Констанц (Німеччина) HTWG Hochschule Konstanz, в рамках якої досліджувалося вимірювання сумарних втрат в реактивних елементах (в дроселях, трансформаторах, конденсаторах, резонансних контурах) та розділення їх на складові.

### **Мета і завдання дослідження.**

*Метою* дисертаційного дослідження є створення нових методів підвищення точності вимірювання активної потужності при великій реактивній складовій в широкому діапазоні частот.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких *завдань*:

- створення таких структурних рішень, які дозволять усунути похибки від власного споживання та впливу фазових зсувів каналів вимірювання активної потужності;
- проведення операцій з середньоквадратичними значеннями сигналів без врахування фазових зсувів вимірювальних каналів перетворювача потужності, що дозволить знизити вимоги до характеристик підсилювачів і забезпечити розширення частотного діапазону;
- досягти передачі ефектів фазових зсувів тільки на зону вхідних ланок приладів, які виконуються на пасивних елементах, і тому є найбільш широкосмуговими, та усунути розділення каналів, що є одним з недоліків типового двоканального ватметра;
- забезпечити точне вимірювання потужності на навантаженні незалежно від фактичного споживання вхідних ланок, що дозволить оптимізувати елементи вхідних каналів за критерієм максимальної широкосмуговості;
- створити можливість розширення діапазону частот шляхом компенсації впливу реактивної складової перетворювача струму на кінцевий результат вимірювання, що може бути досягнуто не тільки апаратними засобами, але і введенням розрахункової корекції після вимірювання значень активної та реактивної складової перетворювача струму.

*Об'єкт дослідження* – процес вимірювання активної потужності при великих реактивних складових в радіочастотному діапазоні, а саме – втрат різноманітних видів перетворювачів електроенергії та їх елементів, а також прохідної потужності бездротових пристроїв передачі електроенергії.

*Предмет дослідження* – методи і засоби підвищення точності вимірювання активної потужності при малому співвідношенні активної та повної потужності.

*Методи дослідження.* Методичну основу проведеного наукового дослідження для розв'язання поставлених задач склали теоретичні та експериментальні методи. При розробці математичних моделей вхідних ланок широкосмугових перетворювачів прохідної потужності використовувалися положення теорії електричних кіл. При аналізі алгоритмів корекції впливу реактивної складової ланки перетворення струму на кінцевий результат вимірювання та корекції характеристики перетворення каналу вимірювання використовувався синтез основних положень теорії вимірювань, теорії структурно-алгоритмічних методів підвищення точності вимірювання, елементи функціонального аналізу.

Експериментальне дослідження метрологічних характеристик, як складових частин, так і усього широкосмугового перетворювача прохідної потужності, здійснювалося за допомогою фізичного та віртуального моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

- вперше створена багатофакторна модель вимірювання електричної потужності, розв’язок системи рівнянь якої відносно активної потужності навантаження забезпечив інваріантність щодо похибок від власного споживання та від фазових зсувів вхідних ланок;
- вперше запропоновано метод визначення потужності втрат реактивного елементу за характеристикою резонансного режиму та набув подальшого розвитку метод визначення потужності втрат реактивного елементу за характеристикою перехідного процесу, в яких можливість визначати втрати в реактивному елементі на частоті кожної гармоніки дозволяє опосередковано розрахувати загальну активну потужність;
- вперше створені методи функціональної програмної корекції, що за допомогою кусково-лінійної та кусково-квадратичної корекцій дозволяють мінімізувати похибки функції перетворення каналу вимірювання активної потужності.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що запропоновані методи та засоби вимірювання дозволяють створити інформаційно вимірювальну систему для визначення втрат в індуктивних елементах. Можливість усунути похибку від власного споживання та вплив фазових зсувів каналів вимірювання ватметра дозволяє вимірювати прохідну активну потужність при великих реактивних складових навантаження в радіочастотному діапазоні. Запропоновані методи та засоби дозволяють забезпечити охоплення частотного діапазону від одиниць Гц до 10 МГц, межі діапазону напруг від 1 В до 1000 В, та межі діапазону струму від 0,1 А до 100 А, при очікуваному коефіцієнті потужності близько 0,1, основну похибку 0,05% в середньому діапазоні частот, та основну похибку не гірше 1% в розширеному діапазоні частот.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень дозволили створити в підприємстві ТОВ «Росток-Прилад ЛТД» вольтметр Ф5053М, що є складовою системи вимірювання потужності на частотах понад 100 кГц з межею основної похибки 0,2%. В залежності від застосованого у вольтметрі детектора може бути проведене вимірювання середнього, амплітудного та середньоквадратичного значення вхідного сигналу. З метою компенсації нелінійності може бути застосована кусково-лінійна або кусково-квадратична програмна корекція. Там же було створено пристрій ВС5155, що є складовою системи для визначення миттєвої зміни активної потужності в малокосинусному режимі роботи двигунів шліфувальних верстатів. Принцип роботи пристрою базується на обробці миттєвих значень сигналів з використанням алгоритму синхронізації нуль-переходів і може бути використаним на малих та середніх частотах з межею основної похибки до 0,02%.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень, серед яких - аналіз вимірювальних сигналів, похибок ватметра прохідної потужності та перетворювачів струму, аналіз метода вимірювання втрат з використанням імпульсного генератора, метода роздільного вимірювання втрат та метода непрямого вимірювання втрат,

дозволили вдосконалити конструкцію бездротової системи передачі електроенергії на основі відкритих резонансних ланцюгів. Дослідження показало ефективність передачі енергії для живлення низько- та середньо-споживаючих пристроїв у промисловості без будь-якої залежності від відносної просторової орієнтації випромінювальних та приймальних пристроїв на відстані до 10 габаритних розмірів відповідних пристроїв. Це відкриває можливість створення безконтактних пристроїв, які можуть розміщуватися на рухомих деталях механізмів, де неможливе підведення постійного живлення. Розроблені рішення, дозволяють створити високочастотний прецизійний вимірювальний прилад, придатний для масового використання, наприклад, в системі обліку електроенергії для бездротової зарядки електричних транспортних засобів.

**Особистий внесок здобувача.** Постановка завдань досліджень, розробка методів та підходів до її вирішення здійснювались спільно з науковим керівником. Роботи [8,15] виконані автором самостійно. У колективних роботах автору безпосередньо належать такі положення: схема вимірювання потужності з вхідною ланкою з додатковим вимірюванням напруги шунта, рівняння перетворення та моделювання [1, 2]; схема вимірювання потужності з вхідною ланкою з середньою точкою шунта, що створена додатковим резистивним подільником, рівняння перетворення та моделювання [3, 5]; аналіз структурної схеми на наявність похибок [4]; аналіз спектрального складу потужності в залежності від вибраних сигналів напруги та струму [6, 14]; аналіз проблем вимірювання в системі безпроводної передачі електроенергії [7, 13]; аналіз похибок систем вимірювання активної потужності [9]; рівняння визначення параметрів реактивних елементів за характеристиками перехідного процесу та характеристиками резонансних режимів [10], алгоритм роботи приладу з функціональною програмною кусково-лінійною корекцією [11]; алгоритм роботи приладу з програмною корекцією та алгоритм синхронізації нуль-переходів [12]; аналіз втрат в індуктивних елементах [16]; схема калібрування на основі синтезатора частоти [17].

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень, що наведені в дисертації, були висвітлені на Міжнародних і Всеукраїнських науково-технічних та науково-практичних конференціях, зокрема: Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM-2018), Paris, France, July 2018 (представлена робота отримала грант від РТВ в рамках секторального проекту: “Support of the Quality Infrastructure - Sectoral, National, Regional”, PN:2015.2066.7/95266-D25); «Technical Using of Measurement – 2018» IV Всеукраїнській науково-технічній конференції у царині метрології м. Славське, 13-18 лютого 2018 року; VII науково-практичній конференції «Метрологічне забезпечення обліку електроенергії в Україні» в ДП «Укрметртестстандарт», липень 2009 року; VII Міжнародній науково-технічній конференції «Гіротехнологія, навігація і управління рухом» в НТУУ «КПІ», 24-25 квітня 2009; VI Міжнародній науково-технічній конференції «Гіротехнології, навігація, управління рухом і побудова авіаційно-космічної техніки» в НТУУ «КПІ», квітень 2007 року.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 17 наукових робіт: 9 статей - у фахових виданнях України, які включенні до міжнародних наукометричних баз; 3 патенти України на корисну модель; 5 тез доповідей - у збірниках матеріалів

вітчизняних та міжнародних конференцій, з яких одна - у виданні іншої держави.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і чотирьох додатків. Загальний обсяг дисертації - 242 сторінки, у тому числі 183 сторінок основного тексту, 117 рисунків, 29 таблиць, список використаних літературних джерел із 87 найменувань на 10 сторінках

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність роботи стосовно розвитку вимірювання активної потужності в широкому діапазоні частот. Сформульовано мету і задачі досліджень, подано коротку анотацію нових наукових положень та відомості про практичне застосування одержаних результатів.

У **першому** розділі роботи проаналізовано об'єкти активна потужність яких вимірюється, зокрема реактивні дросельні елементи, різноманітні види перетворювачів електроенергії та бездротові системи передачі електроенергії.

У реальних дроселях на етапах накопичення і скидання енергії виникають втрати, які є функцією активної потужності:

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt, \quad (1)$$

де  $P_{\Sigma}$  - сумарна активна потужність втрат, яка виділяється в цих елементах,  $u(t)$  - змінна напруга на дроселі,  $i(t)$  - струм через дросель,  $T$  - період  $u(t)$  і  $i(t)$ .

Втрати в дроселі залежать від амплітуди, частоти та швидкості зміни струму, тобто від режиму роботи, що визначається типом вибраного перетворювача енергії. Частота їх робочого режиму сягає сотень кГц, а сигнали можуть бути несинусоїдальними з вищими гармоніками, що можуть сягати одиниць МГц.

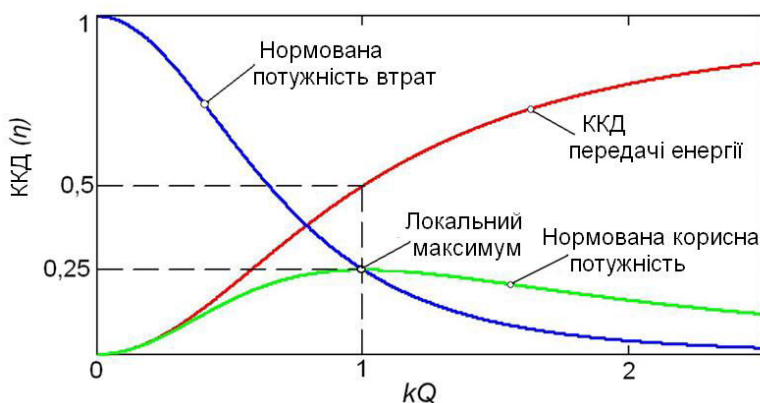


Рисунок 1 - ККД передачі енергії  $\eta$  в системі зв'язаних резонансних контурів, де:  $k$  – коефіцієнт зв'язку;  $Q$  - добротність.

потужність необхідно вимірювати на фоні великого значення реактивної складової, коли робочі частоти зміщуються з резонансної (рис. 2).

Система вимірювання потужності, що розроблена в рамках цієї роботи, може знайти застосування при вимірюванні енергії, що передається за допомогою технології бездротової зарядки в електричних транспортних засобах. Метрологія цього процесу розроблюється в межах проекту "Метрологія для індуктивного заряджання електричних транспортних засобів" (MICEV). Проект MICEV

Крім вимірювання втрат, методи вимірювання активної потужності, що розроблені в рамках цієї роботи, можуть знайти застосування при розробці резонансних систем бездротової передачі електроенергії. Для правильного проектування таких систем потрібно визначати ККД передачі (рис. 1), тобто необхідно проводити точні вимірювання активної потужності. Ці вимірювання ускладнюються тим, що відносно малу активну

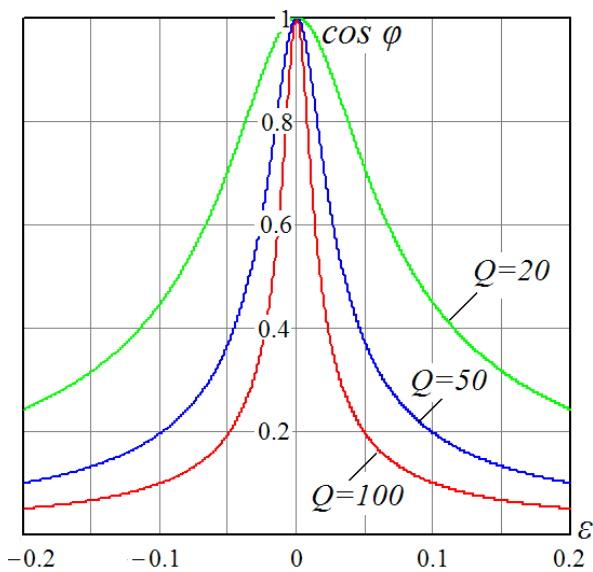


Рисунок 2 – Відношення активної до повної потужності ( $\cos \varphi$ ) в резонансному контурі при зміщенні частоти  $\omega$  від резонансної  $\omega_0$ , де:  $\varepsilon = 2(\omega - \omega_0)/\omega_0$  – відносне розлагодження;  $Q$  – добротність.

розроблюється регіональною метрологічною організацією Європи (EURAMET) в межах європейської метрологічної програми для інновацій та досліджень (EMPIR) як інтегрована частина програми "Горизонт 2020", що є структурною програмою ЄС по дослідженню та інноваціям.

В розділі проаналізовано електричну потужність і її характеристики. Розглянуто основні методи вимірювання активної потужності: непрямі, прямі, трьох вольтметрів і трьох амперметрів та ін. Розглянуто основні засоби вимірювання потужності: перетворювачі напруги – подільники, щупи; перетворювачі струму – шунти, коаксіальні та тріаксіальні шунти, шунти з геометрією типу «клітка», шунти в корпусі для малих струмів, шунти для вимірювань до 10 А та до 1 МГц, кліщі, трансформатори, перетворювачі на основі ефекту Холла.

Як пристрої для вимірювання потужності втрат розглянуті аналізатори потужності. З наведених даних видно, що при вимірюванні на високих частотах та при малому коефіцієнті потужності в них мають місце великі похибки і, крім іншого, паспортна точність вимірювання забезпечується тільки при певному співвідношенні номінальних струму та напруги.

Однією з основних є похибки перетворювачів струму. Розглянуті методи калібрування шунтів: метод порівняння; з вимірюванням співвідношень комплексних опорів; калібрування за допомогою векторного мережевого аналізатора; вимірюванням магнітного поля за допомогою ЯМР. Описано калібрування систем вимірювання електричної потужності в розширеному діапазоні частот. Аналіз об'єктів, в яких вимірюється активна потужність, вказує на необхідність охоплення частотного діапазону від одиниць Гц до 10 МГц, межі діапазону напруг від 1 В до 1000 В, та межі діапазону струму від 0,1 А до 100 А, при очікуваному коефіцієнті потужності близько 0,1. Основна похибка в розширеному діапазоні частот 1%.

**Другий** розділ присвячений аналізу та вдосконаленню методів вимірювання активної потужності втрат.

Проведено аналіз складових вимірювальних сигналів перетворювача потужності. Напруга в дроселях перетворювачів насичена вищими гармоніками, а сумарна активна потужність є сумою активних потужностей від кожної гармонічної складової і визначається в тому числі і зсувами фаз між напругою та струмом. Тому навіть при малих значеннях вищих гармонік активна потужність від них може бути суттєвою.

Проведено аналіз похибок перетворювача прохідної потужності. При високих



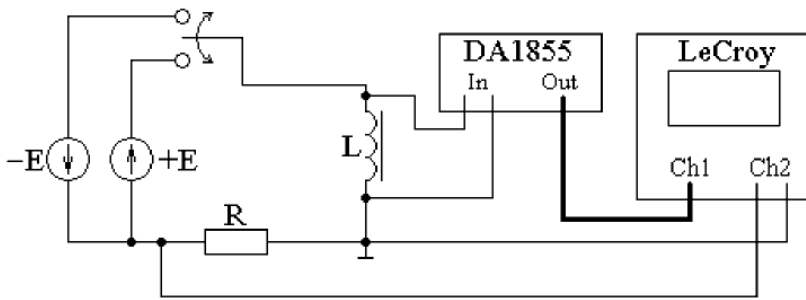


Рисунок 3 - Вимірювання з використанням імпульсного генератора, де L - випробовуваний дросель; R - струмовий шунт; -E і +E - регульовані джерела напруги; DA1855 - диференціальний підсилювач; LeCroy - цифровий двохканальний осцилограф.

частотах канали перетворювача потужності стають дуже чутливими до фазових похибок. Потрібно мінімізувати вплив ланок, які викликають фазові зсуви. В зв'язку з цим важливим є правильна побудова вхідних ланок перетворювача потужності і такий метод, який забезпечить операції з середньоквадратичними значеннями сигналів без врахування фазових зсувів.

Проведене дослідження фазового зсуву перетворювача струму типу «кліщі» з ефектом Холла виявило, що їх використання для вимірювання малокоsinусних сигналів потужності на високих частотах призводить до надмірних похибок, відповідно їх використання є неприйнятним.

Висвітлено створений метод вимірювання втрат з використання імпульсного генератора, який можна представити у вигляді двох джерел постійної напруги, які поперемінно підключаються до дроселя L, що досліджується, створюючи в ньому задану форму струму (рис 3).

Проведено аналіз створених методів безпосереднього та роздільного вимірювання, калориметричного методу та методу непрямого вимірювання втрат. Калориметричний метод можна вважати еталонним і калібрувати будь-який інший метод по ньому, проте недоліком є великий час встановлення результату.

В розділі проведено аналіз створеного метода вимірювання втрат в реактивних елементах за параметрами перехідного процесу, що частково включає метод вимірювання добротності, де вимірюються параметри затухаючого коливального процесу, збудженого в LC контурі єдиним замиканням ключа. В методі опосередковано розраховується активна потужність, що виділяється в реактивному елементі, після визначення втрат на частоті кожної гармоніки.

В методі (рис. 4) спочатку заряджають ємності C1...Cn магазину ємностей до необхідного рівня. Після заряду ємність, необхідна для формування затухаючої гармоніки, від'єднується від джерела і паралельно під'єднується до досліджуваної

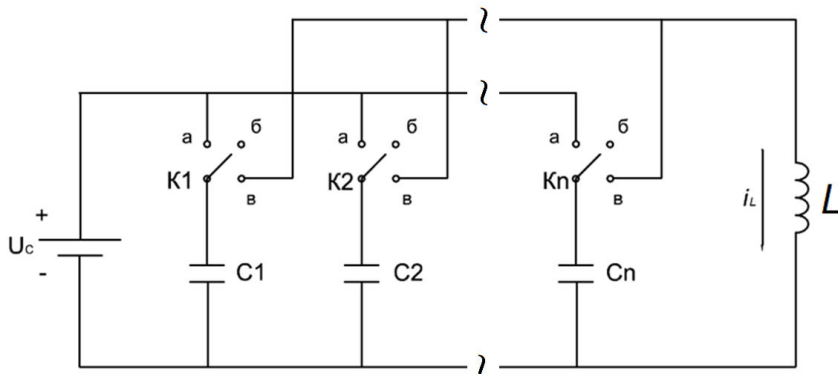


Рисунок 4 - Підключення магазину ємностей (C1...Cn).

індуктивності L. Енергія, що втрачається в контурі за один період  $P = CU_{C1}^2 \ln \frac{U_{C1}}{U_{C2}}$ , де  $U_{C1}$ ,  $U_{C2}$  амплітуди затухаючої напруги на конденсаторі Cn при 1-му

та 2-му періоді, відповідно. Необхідність вимірювання єдиного періоду затухаючого процесу також пов'язана з тим, що реальна індуктивність є нелінійним об'єктом, а втрати в ній мають нелінійний характер. При різних рівнях струмів, що протікають через індуктивність, змінюються і втрати в ній. Використання даного методу забезпечує термічну стабільність реактивного елементу під час проведення вимірювань.

Розглянуто створений метод визначення втрат за характеристиками резонансних режимів. У випадку реального реактивного елементу, де присутнє послідовне з'єднання індуктивності та паразитного опору  $R$ , частота затухаючого коливального процесу  $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$ . Для режиму з почерговим підключенням двох ємностей  $C_1$  та  $C_2$  і відповідними резонансними частотами  $f_1$  та  $f_2$  можна вирахувати індуктивність за формулою  $L = \frac{C_1 - C_2}{C_1 \cdot C_2} \cdot \frac{1}{4\pi^2(f_2^2 - f_1^2)}$ . Активний опір реактивного елементу, що відповідає втратам в ньому, розраховуватиметься за формулою  $R = \sqrt{\frac{4L}{C_1} - 16\pi^2 \cdot L^2 \cdot f_1^2}$ .

В розділі наведено одноканальну схему вимірювання потужності та схему із вхідною ланкою з паралельно розподіленим шунтом. Обидві схеми не враховують вплив індуктивності шунта, що є значним недоліком. Для схеми із вхідною ланкою з паралельно розподіленим шунтом недоліком є те, що необхідно мати два різні шунти.

**Третій** розділ дисертації присвячений дослідженню аналітично-детермінованих моделей та рівнянь перетворення для створених методів, які включають запропоновані схеми із розширенням меж вимірювання шляхом організації вхідних ланок перетворювача потужності, які дозволять усунути похибки від власного споживання та впливу фазових зсувів каналів вимірювання.

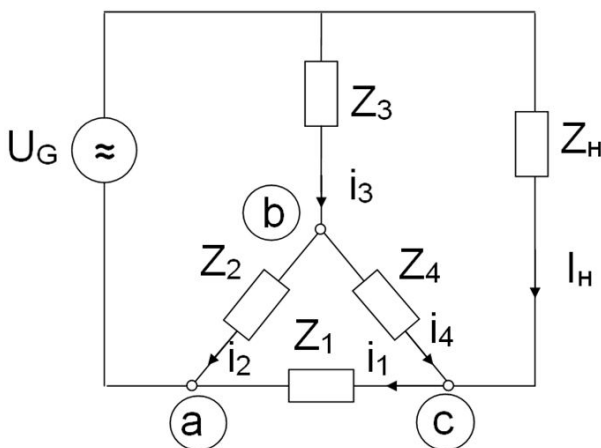


Рисунок 5 - Схема вхідної ланки ватметра з паралельним розподіленим шунтом, де:  $Z_1$ — основний шунт;  $Z_2$ ,  $Z_4$ —допоміжний шунт з двох частин;  $Z_3$ — додатковий опір в подільнику напруги;  $i_H$ —струм навантаження;  $i_H \cdot Z_N = u_H$ — напруга навантаження

Розглянуто вхідну ланку перетворювача потужності з паралельним розподіленим шунтом (рис.5). Для цієї схеми при виконанні умови

$$Z_2(Z_4 + Z_3) = Z_3(Z_1 + Z_4), \quad (2)$$

активна потужність  $P$  буде розраховуватись

$$P = i_H u_H = \frac{Z_3}{Z_1 Z_2} \cdot \left( u_{ba}^2 - \left( 1 + \frac{Z_1}{Z_4} \right)^2 u_{bc}^2 \right). \quad (3)$$

При довільних значеннях опорів подільника та шунта і невиконанні умови (2) в такій схемі необхідно проводити додаткове вимірювання середньоквадратичного значення напруги шунта  $u_{ac}$ , тому запропоновано вхідну ланку перетворювача потужності з додатковим вимірюванням середньоквадратичного значення напруги шунта (рис.6). В цій схемі активна потужність

$P$  визначатиметься, при умові, що  $u_{ba}$ ,  $u_{bc}$  та  $u_{ac}$  є середньоквадратичними значеннями відповідних напруг, та в опорах  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$  відсутні реактивні складові, як

$$P = u_n i_n = \frac{Z_3(Z_1+Z_4)+Z_2(Z_4+Z_3)}{2Z_1Z_2(Z_1+Z_4)} \left( u_{ba}^2 - u_{bc}^2 \left( \frac{Z_1+Z_4}{Z_4} \right)^2 - Z_1 i_n^2 \left( \frac{Z_2(Z_4+Z_3)-Z_3(Z_1+Z_4)}{Z_3(Z_1+Z_4)+Z_2(Z_4+Z_3)} \right) \right), \quad (4)$$

де  $(Z_1 i_n)^2$  розраховується наступним чином

$$(Z_1 i_n)^2 = u_{ac}^2 - \frac{Z_1}{Z_4} ((u_{ba})^2 - (u_{ac})^2 - (u_{bc})^2) + \left( \frac{Z_1}{Z_4} \right)^2 (u_{bc})^2. \quad (5)$$

В схемі на рис. 5 вимірювання проводяться не відносно однієї точки. Для

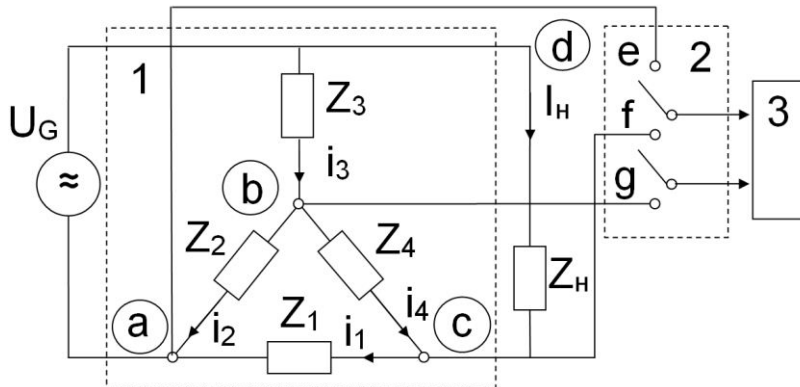


Рисунок 6 - Вхідна ланка ватметра прохідної потужності з додатковим вимірюванням діючого значення напруги шунта, де: 1 - вхідний пристрій, 2 - комутатор, 3 – перетворювач, АЦП та блок обчислення.

подолання цього недоліку в розділі розглянуто схему вхідної ланки з середньою точкою шунта (рис. 7), що створена діленням шунта на дві рівні частини, та схему з середньою точкою, що створена додатковим резистивним подільником (рис. 8). Такі схеми дають можливість проводити всі вимірювання відносно однієї точки, забезпечувати компенсацію похибки від власного споживання та проводити програмну корекцію похибки, спричиненої впливом реактивної компоненти шунта. Критичною особливістю схеми на рис. 6 є складність виготовлення двох високоточних частин шунта.

У схемі на рис.8, для отримання значення потужності вимірюється середньоквадратичне значення напруг  $u_{ba}$ ,  $u_{bc}$  та  $u_{bw}$ ; за формулами розраховується напруга, струм навантаження та косинус зсуву фаз між ними, враховується похибка від реактивної складової ланки шунта та отримується значення активної потужності.

При наявності реактивної

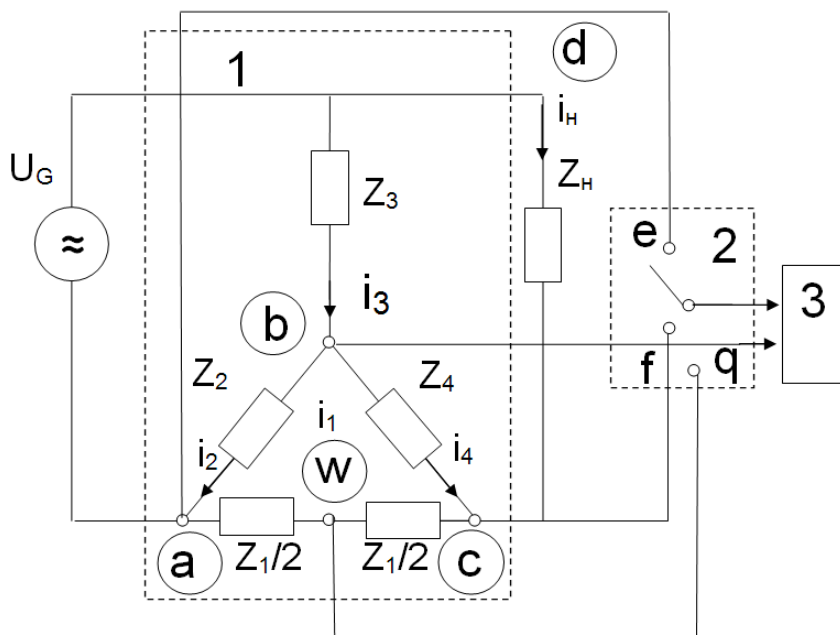


Рисунок 7 - Схема вхідної ланки ватметра з середньою точкою шунта, де:  $Z_1/2$  – два шунти, з опорами рівними половині основного шунта

складової в опорі шунта  $Z_L$ , необхідно проводити корекцію, спричинену наявністю кута  $\varphi_{z1}$ . Якщо шунт являє собою послідовне з'єднання опору  $R1$  та індуктивності  $LI$ , причому індуктивність є незмінна та заздалегідь вимірювана, тоді, знаючи частоту  $F$  змінного струму шунта, можна визначити косинус кута  $\varphi_{z1}$ , що розраховується за формулою:

$$\cos \varphi_{z1} = \frac{R1}{\sqrt{R1^2 + (2\pi \cdot F \cdot LI)^2}}. \quad (6)$$

Середньоквадратичне значення напруги навантаження  $u_H$  розраховується за формулою:

$$u_H = \frac{Z_3}{Z_2} \sqrt{(2u_{bw})^2 - 4 \left( \frac{Z_2(Z_3+Z_4)}{Z_3Z_4} - 1 \right) \cdot \left( \left( \frac{1}{2} u_{ba} \right)^2 - (u_{bw})^2 - \left( \frac{1}{2} u_{bc} \right)^2 \right) + \left( \left( \frac{Z_2(Z_3+Z_4)}{Z_3Z_4} - 1 \right) u_{bc} \right)^2}. \quad (7)$$

Струм навантаження знаходиться використовуючи формулу

$$i_H = \frac{1}{Z_1} \sqrt{(u_{ba})^2 \left( 1 + \frac{Z_3(Z_1+Z_4)}{Z_2(Z_4+Z_3)} \right) + \left( \frac{Z_1+Z_4}{Z_4} \right)^2 (u_{bc})^2 \left( 1 + \frac{Z_2(Z_4+Z_3)}{Z_3(Z_1+Z_4)} \right) - \left( \frac{Z_2}{Z_3} u_H \right)^2 \left( \frac{Z_3(Z_1+Z_4)}{Z_2(Z_4+Z_3)} \right)}. \quad (8)$$

Значення  $\cos(\varphi - \varphi_{z1})$  з врахуванням кута  $\varphi$  між  $u_H$  та  $i_H$ , який визначається реактивною складовою опору  $Z_H$ , та кута  $\varphi_{z1}$ , що визначається дією реактивної складової опору шунта  $Z_1$  на струм  $i_H$ , розраховується за формулою:

$$\cos(\varphi - \varphi_{z1}) = \frac{(u_{ba})^2 \left( 1 + \frac{Z_3(Z_1+Z_4)}{Z_2(Z_4+Z_3)} \right) - \left( \frac{Z_1+Z_4}{Z_4} \right)^2 (u_{bc})^2 \left( 1 + \frac{Z_2(Z_4+Z_3)}{Z_3(Z_1+Z_4)} \right) + \left( \frac{Z_2}{Z_3} u_H \right)^2 \left( 1 - \frac{Z_3(Z_1+Z_4)}{Z_2(Z_4+Z_3)} \right)}{2 \frac{Z_2}{Z_3} u_H \cdot Z_1 i_H}. \quad (9)$$

Корекція впливу, спричиненого зсувом фази  $\varphi_{z1}$ , буде розраховуватись як:

$$\cos \varphi = \cos(\varphi - \varphi_{z1}) \cdot \cos \varphi_{z1} - \sqrt{1 - \cos^2(\varphi - \varphi_{z1})} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{z1}}. \quad (10)$$

З врахуванням (7), (8) та (10) активна потужність при наявності реактивної складової в опорі шунта буде розраховуватись за формулою

$$P = i_H u_H \cos \varphi. \quad (11)$$

Для діапазону частот вище 1 МГц було проведено моделювання в пакеті Multisim з наступним розрахунком отриманих при моделюванні даних. Визначено, що внесення реактивної компоненти шунта значно збільшує відносну похибку розрахунку за схемою на рис. 5 на високих частотах, обмежуючи використання схеми низькими частотами. Також в результаті корекції реактивної компоненти шунта в схемах на рис. 7 та рис. 8 розрахункова відносна похибка активної потужності залишається прийнятною для проведення вимірювань

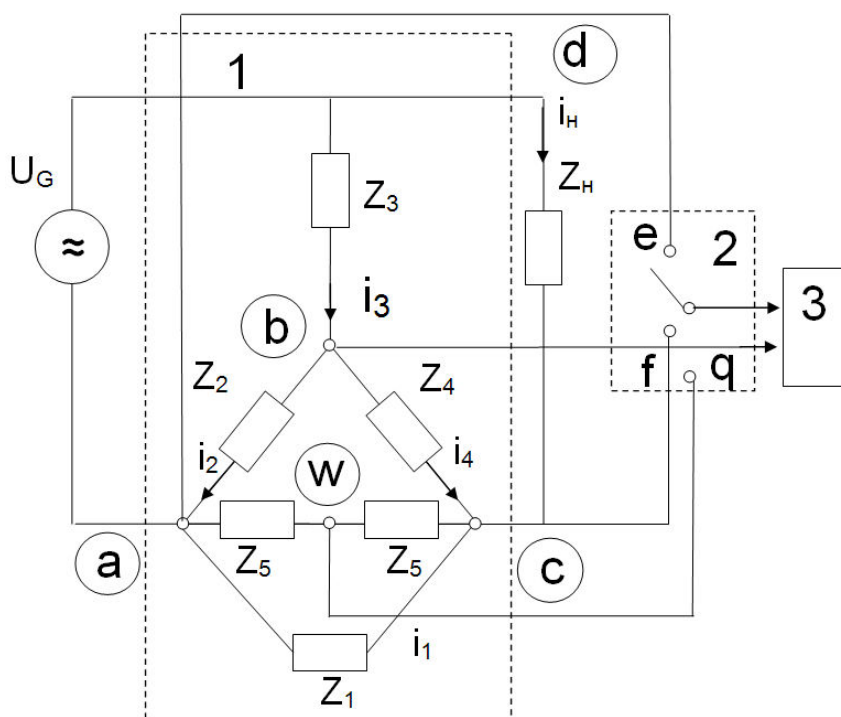


Рисунок 8 - Схема входної ланки з середньою точкою шунта створеною додатковим подільником, де  $Z_1$  – основний шунт;  $Z_5$  – допоміжний подільник з двох однакових опорів, де має виконуватись умова  $Z_5 \gg Z_1$

активної потужності на частотах до 10 МГц та  $\cos\varphi$  на навантаженні до 0,1. В середньому діапазоні частот очікувана основна похибка перетворювача потужності виготовленого за таким методом складає 0,05%, та 1% - на високих частотах. Аналіз вказує на необхідність вибору для подальшого розгляду вхідної ланки, що представлено на рис. 8.

У **четвертому** розділі проведено аналіз та вдосконалення структурної, функціональної та принципової схем перетворювача потужності, в основі якого використано запропоновану вхідну ланку, приведену на рис.8.

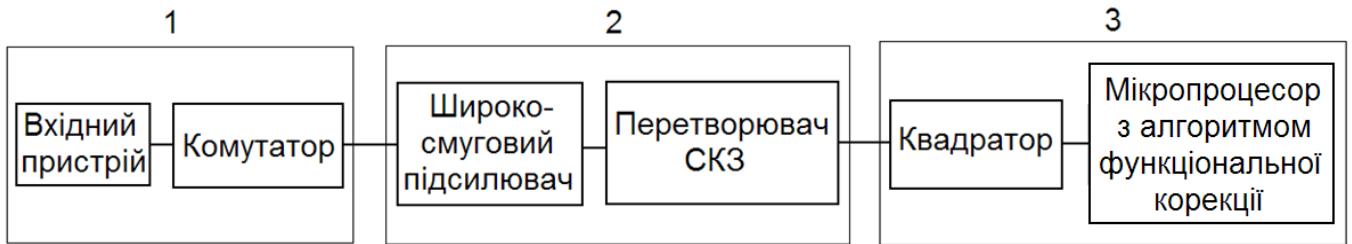


Рисунок 9 - Блоки перетворювача потужності

Аналіз вказує на можливість створення трьох окремих спеціалізованих блоків (рис.9), які можна використовувати як доповнення до відомих засобів вимірювання для розширення їхніх можливостей, або вони можуть бути об'єднані в окремий прилад. Блок 1 включає в себе вхідну ланку та комутатор. Блок 2 є вольтметром середньоквадратичних значень (СКЗ) і складається з широкосмугового підсилювача та перетворювача СКЗ. В якості блока 2 може бути використаний один з наявних широкосмугових вольтметрів змінного струму. Блок 3 має забезпечувати точне піднесення до квадрата та проводити необхідні обчислення. Операція піднесення до квадрата реалізується аналоговим методом або програмно. Блок 3 може бути створений на базі окремого мікропроцесора, чи як елемент програми зовнішнього персонального комп'ютера.

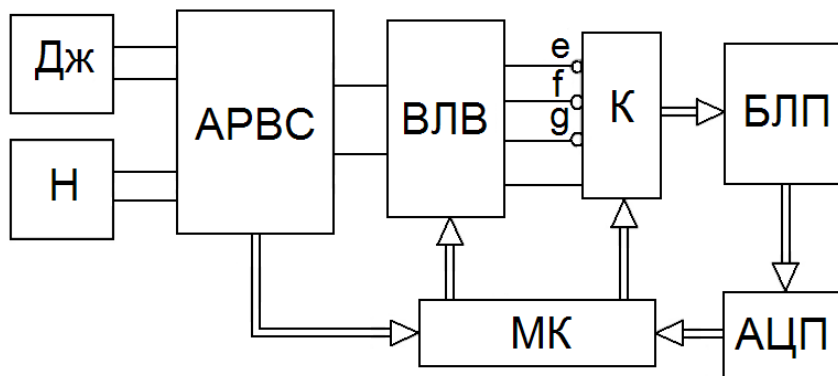


Рисунок 10 – Структурна схема перетворювача потужності, де: Дж – джерело вхідного сигналу; Н – навантаження; АРВС – аналізатор рівнів напруги та струму вхідного сигналу; ВЛВ – вхідна ланка ватметра; К – ключ для перемикавання тактів вимірювання напруг; БЛП – блок лінійного перетворення; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; МК – мікроконтролер з алгоритмом функціональної корекції

Для створення окремого приладу, в якому об'єднуються три блоки, запропоновано структурну схему, представлену на рис. 10. Вхідний сигнал спочатку потрапляє до блоку аналізатора рівнів напруги та струму вхідного сигналу (АРВС), де визначаються межі напруги та струму. Після цього він надходить до вхідної ланки ватметра (ВЛВ), де проходить процес підбору значень опорів шунта та резисторів. Ключем (К)



можна виконати необхідну кількість вимірів напруги, щоб визначити потужність. Виміряні напруги проходять через блок лінійного перетворення (БЛП), де відбувається перетворення СКЗ сигналу у відповідну йому постійну напругу. Після БЛП сигнал надходить на АЦП, а з нього на мікроконтролер (МК), де програмно підноситься до квадрата і визначається потужність згідно з обраною моделлю вимірювання.

БЛП та АЦП є спеціалізованим широкосмуговим вольтметром, в якому для реалізації прецизійних вимірювань застосовані термоелектричні перетворювачі (ТП).

Перевагою ТП є те, що вони безпосередньо реагують на СКЗ вхідного сигналу в широкому частотному діапазоні - від одиниць Гц до сотень МГц. Для уникнення похибок, що виникають при використанні ТП, було вирішено застосувати лінійний термоперетворювач з диференціальним включенням, що реалізує метод взаємно-зворотних перетворень з наступним піднесенням до квадрата цифровим методом.

Для мінімізації кінцевої нелінійності характеристики перетворення у випадку лінійного перетворювача або неквадратичності у випадку використання окремого ТП розроблено введення програмної функціональної корекції.

В розділі розглянута та проаналізована реалізація вхідної ланки, наведені варіанти реалізації матриці подільників та шунтів, обрані відповідні ключі, операційні підсилювачі, АЦП та процесор.

У п'ятому розділі виконано моделювання похибок, що виникають у вхідній ланці на рис.8, і отримано модель невизначеності вимірювання потужності за моделлю відповідного перетворювача потужності.

Для розрахунку моделі невизначеності результату вимірювання, що визначається за формулами (6-11) згідно з центральною граничною теоремою, враховуючи, що кількість компонентів понад чотири, кінцевий закон розподілу стандартної невизначеності буде нормальним. Для аналізу моделі використано данні симуляції в системі Multisim.

В роботі наведений результат розрахунку активної потужності  $P'$  без корекції,

тобто без врахування впливу  $\cos\varphi_{z1}$  (індуктивності шунта) (рис.11). Похибка в такому випадку може сягати 100%.

Згідно з ДСТУ ІЕС 60051-1:2004 та ГОСТ8476-93(МЭК 51-3-84) основну похибку малокосинусних ватметрів дозволяється визначати по формулі

$$\gamma = \gamma_r + \gamma_\delta \frac{\alpha}{A}, \quad (12)$$

де  $\gamma_r$  - похибка у відсотках від кінцевого значення діапазону вимірювання (нормуючого значення), отримана на відмітці  $\alpha$  на постійному струмі чи змінному струмі при

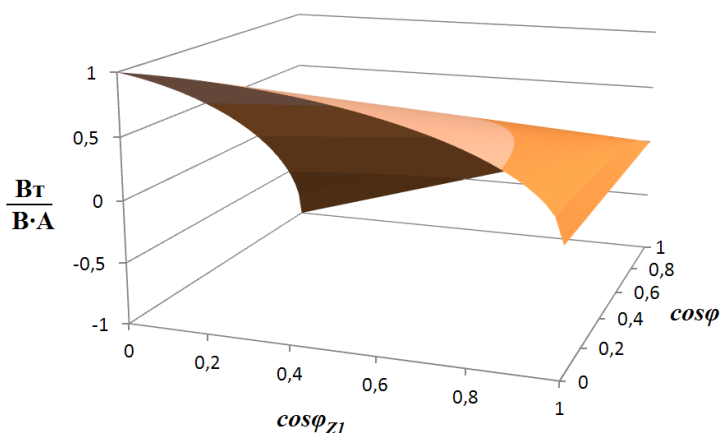


Рисунок 11 - Залежність від зміни  $\cos\varphi$  та  $\cos\varphi_{z1}$  похибки вимірювання активної потужності відносно номінальних меж вимірювання, при відсутності корекції  $\cos\varphi_{z1}$  шунта

$\cos\varphi = 1$ ;  $\gamma_\delta$  - фазова похибка ватметра у відсотках від кінцевого значення діапазону вимірювання при зсуві  $90^\circ$  між напругою та струмом та при номінальних значеннях останніх;  $\alpha$  – відмітка шкали, на якій визначалася похибка;  $A$  - відмітка шкали, що відповідає верхньому значенню діапазону вимірювання.

Відповідно до формули (12) в розділі проведена оцінка впливу діапазонів вимірювання при зміні коефіцієнта потужності від 1 до 0.

Оцінка стандартної невизначеності результату вимірювання активної потужності на різних частотах при різних значеннях  $\cos\varphi$  навантаження та на всіх межах вимірювання вказує на те, що врахування впливу індуктивності шунта дозволяє проводити вимірювання активної потужності навантаження без похибки власного споживання перетворювача потужності з точністю до 1% на частотах до 10 МГц та коефіцієнтом потужності навантаження 0,1, а також визначати значення напруги, струму та коефіцієнт потужності навантаження.

**Шостий** розділ присвячений експериментальному застосуванню та впровадженню результатів наукової роботи.

В розділі описується розроблений за результатами теоретичних і експериментальних досліджень в ТОВ «Росток-Прилад ЛТД» вольтметр Ф5053М, що є складовим системи вимірювання потужності на частотах понад 100 кГц з межею основної похибки 0,2%. В приладі застосована кусково-лінійна або кусково-квадратична програмна корекція (рис. 12). В залежності від застосованого детектора може бути проведене вимірювання середнього, амплітудного та середньоквадратичного значення вхідного сигналу. Також, в ТОВ «Росток- Прилад

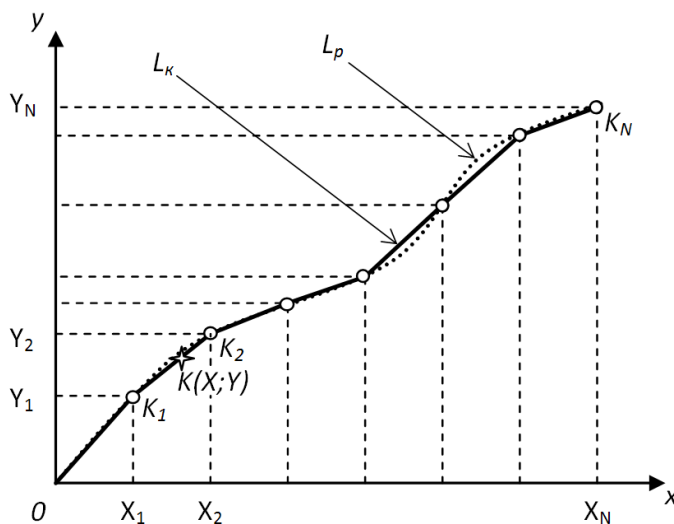


Рисунок 12 - Функції перетворення вимірювального приладу з корекцією:  $L_p$  - реальна функція перетворення та  $L_k$  - кусково-лінійна функція після корекції

ЛТД» було створено пристрій ВС5155, що є складовим системи вимірювання потужності. В ньому використовується цифрова обробка інформаційних сигналів для визначення миттєвої зміни активної потужності в малокосинусному режимі роботи двигунів шліфувальних верстатів. Він базується на обробці миттєвих значень сигналів, використовуючи алгоритм синхронізації нуль-переходів, що дозволяє точно вимірювати частоту сигналу напруги без організації окремого вимірювального каналу, і може бути використаний на малих та середніх частотах з точністю до 0,02%.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень дозволили вдосконалити конструкцію бездротової системи передачі електроенергії на основі відкритих резонансних ланцюгів. В ході дослідження було встановлено, що при використанні приймальної схеми, в якій навантаження підключено до «землі», насправді формується однопровідна система передачі електричної енергії, в якій

«земля» служить провідником. Якщо навантаження під'єднано до іншого однополюсного резонансного ланцюга (рис.13), який починає діяти як віртуальна «земля», створюється дійсно бездротова система передачі. Виникає присутність ефекту «освітлення» приймального ланцюга. Віртуальний контур «землі» повинен

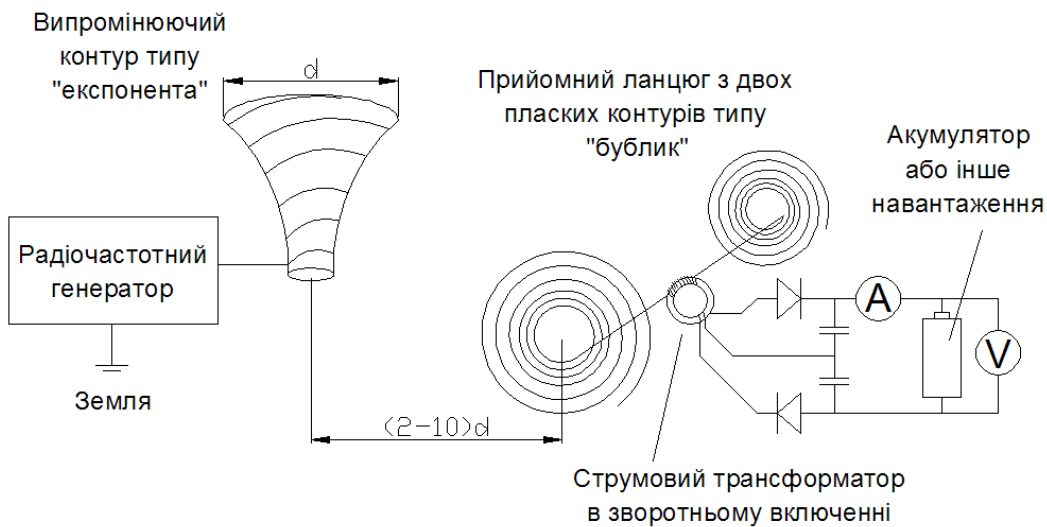


Рисунок 13 - Бездротова система передачі електроенергії.

знаходитися в стані меншої «освітленості», це досягається або завдяки його більшій відстані від ланцюга випромінювання ніж приймальний ланцюг, або зменшенням її ефективної площі або заряду, що створюється

конструктивною різницею побудови контурів.

Експериментальний аналіз ефективності передачі електроенергії з використанням розроблених методів вимірювання показав, що дана система підходить для живлення низько та середньо споживаючих пристроїв у промисловості без будь-якої залежності від відносної орієнтації випромінювальних та приймальних ланцюгів на відстані до 10 лінійних розмірів відповідних ланцюгів. Це відкриває можливість створення безконтактних пристроїв, що можуть розміщуватися на рухомих деталях механізмів, де неможливе підведення постійного живлення.

В системах, які досліджують високочастотну малокосинусну прохідну потужність, що представлені в цій роботі, присутні змінні електромагнітні поля, що можуть впливати на оператора. Рекомендації по обмеженню впливу, створеного змінними в часі електричними та магнітними полями (від 1 Гц до 100 кГц), наведені в додатках до роботи.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача по розробці та дослідженню нових методів для вимірювання активної потужності при великій реактивній складовій на високих частотах за допомогою створення багатофакторної моделі вимірювання потужності, розв'язок якої відносно активної потужності навантаження забезпечує інваріантність щодо похибок від власного споживання та від фазових зсувів вхідних ланок. Для мінімізації похибки пристрою перетворення активної потужності створені методи функціональної програмної корекції. Коректність моделі підтверджено програмним моделюванням та відповідними розрахунками. Ефективність методів функціональної програмної корекції, реалізованих в складових системи вимірювання потужності підтверджено при їх впровадженні.



Отримані результати дають підстави сформулювати наступні висновки, що мають теоретичне й практичне значення.

1. Створено методи вимірювання, які дозволяють мінімізувати похибки від фазових зсувів та похибки від власного споживання вхідних ланок, внаслідок реалізації добутку миттєвих значень сигналів напруги та струму шляхом піднесення до квадрата суми пов'язаних з ними сигналів, що дозволяє забезпечити:

- застосування часового розділення каналів перетворення вихідних напруг вхідної ланки, що призводить до зменшення адитивних похибок, а вимірювання середньоквадратичного значення сигналів анулює вимоги до фазових характеристик підсилювачів, що сприяє розширенню частотного діапазону;

- вимірювання точних значень потужності на навантаженні незалежно від фактичного споживання вхідним пристроєм;

- можливість оптимізації значення елементів вхідного пристрою за критерієм максимальної широкосмуговості (оскільки він виконується на пасивних елементах та враховується похибка власного споживання, можна збільшити опір шунта і зменшити опір подільника напруги, що сприяє розширенню частотного діапазону);

- можливість розширення діапазону частот шляхом компенсації впливу реактивної складової ланки шунта на кінцевий результат вимірювання, що може бути досягнуто не тільки апаратними засобами, але і введенням розрахункової корекції після вимірювання значень активної та реактивної складової шунта;

- технічні рішення, що дозволяють створити високочастотний прецизійний вимірювальний прилад, придатний для масового використання, наприклад, в системі обліку електроенергії для індуктивної зарядки електричних транспортних засобів.

2. Для вимірювання втрат окремого реактивного елемента запропоновано метод визначення параметрів за характеристиками перехідного процесу та характеристиками резонансних режимів, що дозволяє визначити втрати в реактивному елементі на частотах кожної гармоніки, що входить в активну потужність, та опосередковано розрахувати сумарну активну потужність.

3. Правильна оцінка факторів впливу та загальних характеристик резонансної системи передачі електроенергії дала змогу проводити вимірювання, результати яких дозволили:

- вдосконалити конструкцію бездротової системи передачі електроенергії на основі відкритих резонансних ланцюгів;

- сконструювати варіант безпровідної системи, де навантаження замість «землі» підключене до іншого однополюсного резонансного ланцюга, що починає діяти як віртуальна «земля» і створює дійсно бездротову систему передачі електроенергії;

- визначити діючі фактори та надати рекомендації по обмеженню впливу створеного змінними в часі електричними та магнітними полями.

4. Проведено аналіз вимірювальних сигналів та похибок перетворювачів прохідної потужності, перетворювачів струму, вимірювання втрат з використанням імпульсного генератора, метода роздільного та метода непрямого вимірювання втрат.

5. На основі виведених формул у програмному середовищі MultiSim промодельовані вхідні ланки перетворювачів потужності. Проведено розрахунок

похибок, що виникають у вхідній ланці, і обчислено невизначеність вимірювання потужності за моделлю ватметра з вхідною ланкою, що містить середню точку шунта, створену додатковим резистивним подільником. Проведено аналіз, який підтвердив правильність створеної моделі та правильність врахування впливу реактивності шунта, що дозволяє проводити вимірювання напруги, струму, коефіцієнта потужності та активної потужності навантаження з точністю до 1% на частотах до 10 МГц та коефіцієнтом потужності навантаження 0,1.

6. Результати роботи використані в підприємстві ТОВ «Росток-Прилад ЛТД» для створення складових системи вимірювання потужності, а саме: вольтметр Ф5053М для роботи в розширеному діапазоні частот, в якому в залежності від застосованого детектора може бути проведене вимірювання середньовипрямленого, амплітудного та середньоквадратичного значення вхідного сигналу, і застосована кусково-лінійна або кусково-квадратична програмна корекція; пристрій ВС5155 для визначення поточного значення активної потужності, який базується на обробці миттєвих значень сигналів напруги та струму і може бути використаним на промислових частотах.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Вдовиченко А. В. Підвищення точності вимірювання активної потужності шляхом додаткового вимірювання напруги на шунті / А. В. Вдовиченко, Ю. М. Туз// Метрологія та прилади. Науково-виробничий журнал. – № 3 (71). – Харків : ВКФ "Фавор", 2018. – С. 11-16
2. Патент на корисну модель UA №128592, Ватметр змінного струму / Вдовиченко А. В., Туз Ю.М.; МПК ((2018.01), UA, G01R 21/00.
3. Патент на корисну модель UA №128005, Ватметр змінного струму / Вдовиченко А. В., Туз Ю.М.; МПК ((2018.01), UA, G01R 21/00.
4. Патент на корисну модель UA №94817, Ватметр змінного струму /Туз Ю.М., Архіпова А.О., Артюхова Ю.В., Вдовиченко А.В.; IPC (2014.01), G01R 21/00.
5. Вдовиченко А. В. Підвищення точності вимірювання активної потужності за значної реактивної складової навантаження створенням середньої точки шунта / А. В. Вдовиченко, Ю. М. Туз// Вимірювальна техніка та метрологія. Науковий журнал. № (1)79. – Львів: Національний Університет “Львівська політехніка”, 2018. - с. 76-81, <http://dx.doi.org/10.23939/istcmtm2018.01.076>.
6. Туз Ю. М. Вимірювання активної потужності реактивного навантаження в широкому діапазоні частот / Ю. М. Туз, А. В. Вдовиченко // Інформаційні системи, механіка та керування. Науково-технічний збірник. – Київ: НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», - № 18, - с. 5-11, - 2018, DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-3804182018129503>.
7. Вдовиченко А. В. Підвищення точності вимірювання активної потужності при значній реактивній складовій / А. В. Вдовиченко, Ю. М. Туз// Інформаційні системи, механіка та керування. Науково-технічний збірник. – Київ: НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», - № 17, - с. 12-18, - 2017., DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-3804172017121717>
8. Вдовиченко А.В. Аналіз втрат в дроселях-накопичувачах / А.В. Вдовиченко // Енергетика: економіка, технології, екологія. - Випуск №2, - с. 15 -21, - 2010.
9. Туз Ю. М. Система вимірювання і дослідження електричних параметрів в

елементах енергозощаджувальних перетворювачів енергії / Ю. М. Туз, А. В. Вдовиченко // Метрологія та прилади. Науково-виробничий журнал. - Харків: ВКФ "Фавор", - № 6 (26), - с. 18-21, - 2010.

10. Вдовиченко А.В. Вимірювання втрат в індуктивностях за параметрами перехідного процесу / А. В. Вдовиченко, Ю. М. Туз // Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". - 2010. - № 5. - С. 126-132.

11. Туз Ю.М, Вдовиченко А.В., Токовенко С.О./ Вимірювальні прилади з переналаджованою програмною корекцією // Метрологія та прилади. Науково-виробничий журнал. – № 3 (29). – Харків : ВКФ "Фавор", 2011. – С. 17-21.

12. Туз Ю.М, Вдовиченко А.В., Токовенко С.О./ Прилади вимірювання та аналізу відносної зміни поточних значень потужності з переналаджованою програмною корекцією// Метрологія та прилади. Науково-виробничий журнал. – № 1 (45). – Харків : ВКФ "Фавор", 2014. – С. 17-22.

13. A.V.Vdovychenko, Y.M.Tuz, "Power Measurement at Wireless Transmission of Electricity in the Frequency Range from 0.01 to 10 MHz" in Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM-2018), Paris, France, July 2018, pp. 75–76, DOI: 10.1109/CPEM.2018.8500807.

14. Туз Ю.М, Вдовиченко А. В., Проблеми вимірювання активної потужності реактивного навантаження в широкому діапазоні частот. - Тези доповідей, «Technical Using of Measurement – 2018» IV Всеукраїнська науково-технічна конференція у царині метрології м. Славське, 13-18 лютого 2018 року.

15. Вдовиченко А.В., «Втрати в індуктивних елементах», Збірник статей VII науково-практичної конференції «Метрологічне забезпечення обліку електроенергії в Україні», Київське ДП «Укрметртестстандарт», липень 2009 року.

16. Вдовиченко А.В., Туз Ю.М. Втрати в індуктивних елементах // VII Міжнародна наук.-техн. конф. «Гіротехнологія, навігація і управління рухом». Тези доповідей. – К.: НТУУ «КПІ», 24-25 квітня 2009. – С. 52.

17. Туз Ю.М, Вдовиченко А.В., «Калібратори змінної напруги», Збірник статей VI Міжнародної науково-технічної конференції «Гіротехнології, навігація, управління рухом і побудова авіаційно-космічної техніки», НТУУ «КПІ», с. 326-333, квітень 2007 р.

## АНОТАЦІЯ

**Вдовиченко А.В. Методи та засоби підвищення точності вимірювання активної потужності при малому співвідношенні активної та повної потужності. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02 - стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення. - Національний Технічний Університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена розробці та дослідженню нових методів та засобів для вимірювання активної потужності при малому співвідношенні активної та повної потужності в розширеному діапазоні частот. Такі методи дозволяють вимірювати активну потужність втрат в різноманітних реактивних елементах, наприклад,

індуктивностях, які використовуються в імпульсних перетворювачах енергії. Одержані результати також можуть знайти застосування при вимірюванні активної потужності, що передається в системах бездротової передачі електроенергії. При вимірюваннях в розширеному діапазоні частот присутні похибки від фазових зсувів в каналах вимірювання та похибки від власного споживання вхідних ланок, які, крім сильного спотворення результатів вимірювання потужності, призводять до того, що паспортна точність забезпечується тільки при певному співвідношенні номінальних струмів та напруг. В даній роботі запропоновано структурні рішення, які забезпечують мінімізацію похибки від власного споживання та впливу фазових зсувів каналів вимірювання перетворювача потужності, що дозволяє створити широкосмуговий перетворювач прохідної потужності для вимірювання активної потужності при великих реактивних складових навантаження в радіочастотному діапазоні.

**Ключові слова:** вимірювання потужності, активна потужність, радіочастотний діапазон, фазовий зсув, корекція похибок власного споживання, втрати, шунт, бездротова передача електроенергії.

## АННОТАЦИЯ

**Вдовиченко А.В. Методы и средства повышения точности измерения активной мощности при малом соотношении активной и полной мощности. - На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.01.02 - стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение. - Национальный Технический Университет Украины «Киевский Политехнический Институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2019.

Диссертация посвящена разработке и исследованию новых методов и средств для измерения активной мощности при малом соотношении активной и полной мощности в расширенном диапазоне частот. Такие методы позволяют измерять активную мощность потерь в различных реактивных элементах, например, индуктивностях, которые используются в импульсных преобразователях энергии. Полученные результаты также могут найти применение при измерении активной мощности которая передается в системах беспроводной передачи электроэнергии. При измерениях на высоких частотах присутствуют погрешности от фазовых сдвигов в каналах измерения и погрешности от собственного потребления входных звеньев, которые, кроме сильного искажения результатов измерения мощности, приводят к тому, что паспортная точность обеспечивается только при определенном соотношении номинальных токов и напряжений. В данной работе предложены структурные решения, обеспечивающие минимизацию погрешности от собственного потребления и влияния фазовых сдвигов каналов измерения ваттметра, что позволяет создать широкополосный преобразователь проходной мощности для измерения активной мощности при больших реактивных составляющих нагрузки в радиочастотном диапазоне.

**Ключевые слова:** измерение мощности, активная мощность, радиочастотный диапазон, фазовый сдвиг, коррекция погрешности собственного потребления, потери, шунт, беспроводная передача электроэнергии.

## ANNOTATION

**Vdovychenko A.V. Methods and means of increasing the accuracy of measuring the active power at a low ratio of active and total power. - Manuscript.**

The dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences on the specialty 05.01.02 - standardization, certification and metrological support. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019

The dissertation is devoted to the development and research of new methods and means for measuring active power at a high reactive component at high frequencies. Such methods allow measuring the active power of losses in a variety of reactive elements, for example, the inductances used in pulsed energy converters. The obtained results can also be used in the measurement of active power transmitted in wireless power transmission systems. At measurements at high frequencies, there are errors from phase shifts in measuring channels and errors from the intake of input units, which, in addition to the strong distortion of the results of power measuring, leads to the fact that passport accuracy is ensured only with a certain ratio of nominal currents and voltages. In this paper, structural solutions are proposed that provide compensation for the error of their own consumption and the effect of phase shifts of the measurement channels of the wattmeter, which allows the creation of a broadband wattmeter of transmit power for the measurement of active power at high reactive component loads in the radio frequency range. The advantages of the developed wattmeter are:

- provided operations with signal rms values without taking into account phase shifts of the wattmeter measuring channels;
- low requirements for the phase characteristics of the amplifier that provides larger bandwidth;
- transferring the effects of phase shifts only to the zone of input sections of the circuit, which are executed on passive elements and therefore are the most broadband;
- gives the exact value of the measured power on the load, regardless of the actual consumption by the input device;
- no channel separation, which is one of the major disadvantage of a typical two-channel wattmeter;
- reduction of the voltage channel additive errors;
- the values of the input-link elements can be optimized by the criterion of maximum broadband, since the error from own consumption is taken into account, it is possible to increase the resistance of the shunt and reduce the resistance of the voltage divider, which will increase their broadband;
- one low-level shunt, is used in the scheme;
- possibility to extend the frequency range by compensating reactive component influence of the shunt link on the final result of the measurement, which can be achieved not only by hardware (reduction of the shunt inductance), but also by the introduction of the calculated correction after measuring the values of the active and reactive component of the shunt;
- simplicity of the circuit makes it possible to build a high-frequency precision measurement device for mass use, for example, in the electricity accounting system for inductive charging of electric vehicles or other.

In this work the objects of measurement, such as throttling elements and losses in them, various types of power converters and wireless power transmission systems are analyzed, and recommendations are given for limiting the influence of electric and magnetic fields created by time variables. A review of the known technical solutions of methods and means of measuring power is given. The power meters, voltage and current converters, main types of high-frequency shunts and methods of their calibration presented. The analysis of measuring signals, errors of the wattmeter of the transmitted power, the current converter, the measurement of losses from the use of the pulse generator and the losses in the inductances by the parameters of the transition process are carried out. Systems of equations and conversion equations presented and compiled for one-channel power measurement schemes with input links with the exception of the error of their consumption and the error of the phase shifts of the measuring channels, by measuring the rms signals values at certain points: with an additional measurement of the shunt voltage, with an average point of the shunt and an average point of the shunt created by the additional resistive divider. The model of power measurement without error from own consumption and phase bias between measuring channels is deduced and analyzed in the work. On the basis of the derived formulas, input terminals of the wattmeter were modeled to determine the power without error from their own consumption in the MultiSim 11.0 software environment and studies were conducted to confirm the correctness of the created model. The structural, functional and principle schemes of the wide-bandwidth meter with an input link are developed, which provides compensation for the error of their own consumption and the phase error of the measuring channels. The analysis and calculation of the errors occurring in the input link during the measurement and the uncertainty of power measurement on the basis of the model of the wattmeter with the input link with a parallel distributed shunt containing the average point of the shunt created by the additional resistive divider was calculated. Examples of implementation of elements of methods and tools developed in this work are given.

The results of theoretical and experimental studies allowed creation at the enterprise of Rostok-Instrument Ltd of a voltmeter  $\Phi 5053M$  which is an integral part of the system for measuring power at high frequencies and device BC5155 that can be used at low and medium frequencies.

The results of theoretical and experimental researches, among which - the analysis of measuring signals, errors of the wattmeter of transient power and current converters, the analysis of the method of measuring losses using pulsed generator, the method of separate measurement of losses and the method of indirect measurement of losses, allowed to improve the design of wireless power transmission system on the basis of open resonant circuits. The research has shown the efficiency of the transmission for powering low and medium-sized devices in the industry without any dependence on the relative spatial orientation of the emitting and receiving circuits. This opens up the possibility of creating contactless devices that can be placed on moving parts of mechanisms where it is impossible to supply a constant supply.

**Keywords** - power measurement, active power, radio frequency range, phase noise, correction of own consumption errors, losses, shunt, wireless power transmission

Підписано до друку 14.06.2019. Формат 60х90/16. Папір офсетний.  
Друк плоский. Гарнітура Times New Roman.  
Обл.- вид. арк. 0,9. Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. № 01/101.  
Віддруковано з оригінал-макета в друкарні «Атопол»  
03058, м. Київ, вул. Вацвала Гавела, 4, тел.: (044) 408-03-31.